Ein neuer Effekt bei der Glimmentladung in Argon.

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Doktorwürde

genehmigt

von der mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn.

Von

Karl Geiger

aus Oberkirch.

Berlin 1937

Berichterstatter: Prof. Dr. Walter Weizel

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Sonderabdruck aus der Zeitschrift für Physik
Bd. 106 Heft 1 u. 2

Eine zylinderförmige Anode umgibt zwei völlig gleiche, einander gegenüberstehende, kreisscheibenförmige Kathoden, die auf verschiedenen Potentialen sein können. Unter geeigneten Umständen bildet sich eine Glimmentladung aus, bei der der größere Teil des Gesamtstromes von derjenigen Kathode geliefert wird, an der die kleinere Spannung gegen die Anode liegt. Dieser eigenartige Effekt wird untersucht für Eisen- und Messingelektroden bei verschiedenen Anordnungen. Er wird zurückgeführt auf die besonderen Eigenschaften der differentiellen Ionisierung von Elektronen in Argon, die eine größere Ionendichte in der Nähe der Elektrode mit der kleineren Spannung zur Folge haben.

1. Einleitung.

In einer Glimmentladung in Argon tritt unter geeigneten Umständen ein sehr merkwürdiger Effekt auf:

Bei einem Gasdruck von 0,75 Torr werden z. B. zwei gleichgroße ebene Eisenelektroden in einem Abstand von 2 cm einander gegenübergestellt; eine dritte Elektrode befinde sich an einem anderen Orte und habe das Potential Null. Gibt man der einen der beiden gegenüberstehenden Elektroden das Potential — 150 Volt, der anderen das Potential — 600 Volt, so erhält man eine Glimmentladung, bei der diese beiden Elektroden als *Kathoden* wirken. Jedermann würde erwarten, daß an die Kathode mit — 600 Volt ein größerer Strom fließt als an die mit — 150 Volt. Das Gegenteil ist der Fall. An die Kathode mit — 600 Volt fließen 300 mA, an die mit — 150 Volt etwa 350 mA.

Hierbei handelt es sich jedoch nicht um die bekannte Erscheinung einer fallenden Charakteristik. Bringt man beide Elektroden auf gleiches Potential, so daß sie als Hohlkathode wirken, so steigt die Charakteristik; hält man das Potential der einen Elektrode konstant und variiert das der anderen in einem passenden Intervall, so ist die Charakteristik der Entladung an der zweiten Elektrode stets steigend.

Die beschriebene Erscheinung tritt nicht nur bei den oben angegebenen Werten für Abstand, Druck und Spannungen auf, sondern zeigt sich mehr oder weniger ausgeprägt immer dann, wenn sich in Argon die beiden als

Kathoden wirkenden Elektroden so nahe gegenüberstehen, daß sich ihre Glimmlichter durchdringen.

Um die Ursache des merkwürdigen Effektes zu ermitteln, wurden Versuche ausgeführt mit Eisen- und Messingelektroden, die sich in verschiedenen Abständen zwischen 0,7 und 4 cm befanden. Der Gasdruck wurde zwischen 0,4 und 4 Torr variiert.

2. *Meßanordnung.*

Als Kathoden wurden zwei wassergekühlte Scheibenelektroden E_1 und E_2 von 58 mm Durchmesser verwendet (Fig. 1a und 1b). Ein Metall-

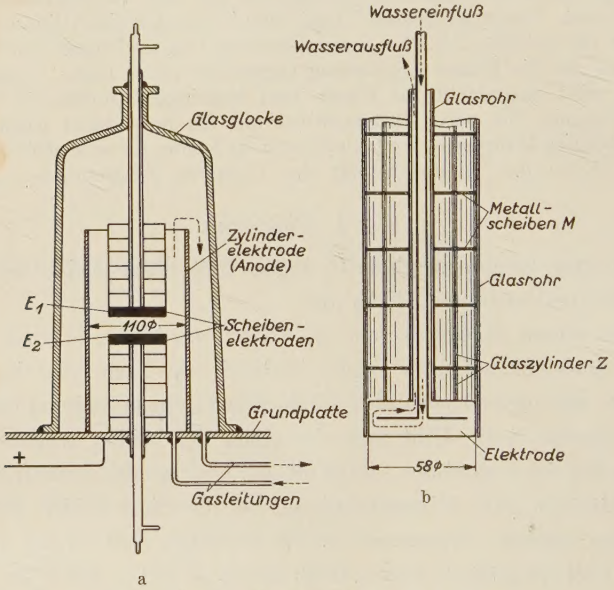

Fig. 1. Meßanordnung.
a) Rezipient mit Elektrodenanordnung; b) Elektrode.

zylinder aus dem gleichen Material, der die beiden Scheibenelektroden umgab, war Anode. Er stand auf der Grundplatte, durch die auch die Stromzufuhr erfolgte. Die Elektrodenanordnung befand sich unter einem Rezipienten aus Glas, der auf die Grundplatte gekittet war. Die untere Elektrode wurde isoliert durch die Grundplatte geführt, die obere in den Tubus der Glasglocke gekittet. Einzelheiten der Meßanordnung sind an anderer Stelle ausführlicher beschrieben[1]).

[1]) H. Fischer, Dissertation Karlsruhe 1936; W. Weizel u. H. Fischer, Ann. d. Phys. **24**, 209, 1935.

3. Die Durchführung der Reinigung.

Die Elektroden gaben besonders am Anfang große Mengen von Verunreinigungen ab. Aus diesem Grunde mußte das Argon immer wieder gereinigt werden. Das Gas wurde hierzu zwischen den einzelnen Messungen mit einer Gaedeschen Diffusionspumpe durch eine Glimmentladung zwischen Magnesiumelektroden gepumpt. Um Quecksilber- und Wasserdampf zu entfernen, führten die beiden Glaszuleitungen zum Rezipienten durch Flüssige-Luft-Fallen. Die Verunreinigungen der Elektrodenoberflächen ließen sich beseitigen, wenn man das Entladungsrohr längere Zeit mit großem Strom belastete. Bei dauerndem Zirkulieren des Gases durch die Glimmentladung zwischen den Magnesiumelektroden wurde das Argon wieder gereinigt. Dieses Reinigungsrohr ließ sich mit transformiertem Netzstrom betreiben. Zur Stabilisierung wurde der Primärstrom des Transformators durch einen Vorschaltwiderstand beschränkt. Bei der Reinigung war darauf zu achten, daß die Gesamtbrenndauer des zur Messung dienenden Entladungsrohres möglichst kurz war, damit es nicht durch metallische Bestäubung von Isolationsteilen unbrauchbar wurde. Die Entladung wurde deshalb pro Stunde insgesamt nur 5 bis 15 Minuten gebrannt, während das Gas hierbei ohne Unterbrechung durch das Reinigungsrohr gepumpt wurde.

Das Fortschreiten der Reinigung ließ sich am besten an der Änderung der Brennspannung bei gleicher Stromstärke, Druck und Abstand beobachten. Nachdem die neu aufgebaute Apparatur einen halben Tag lang auf die angegebene Art gereinigt war, lag die Brennspannung für 300 mA Strom bei etwa 450 Volt. Sie änderte sich während des Brennens nur unwesentlich. Das Spektrum zeigte als einzige Verunreinigung Wasserstoff. An diesem Zustand änderte sich in den darauffolgenden 8 bis 10 Stunden nur wenig. Nach dieser Zeit gaben die Elektroden keine so großen Mengen von Verunreinigungen mehr ab. Dies zeigte sich daran, daß die Brennspannung gleich nach dem Einschalten der Entladung nur noch 380 Volt war. Aber schon nach wenigen Sekunden hatten die Elektroden genügend Verunreinigungen abgegeben, daß die Brennspannung wieder auf 450 Volt stieg. Das weitere Reinigen hatte zur Folge, daß die Brennspannung nach dem Einschalten immer kleiner wurde und der Anstieg immer langsamer vor sich ging. Nach weiteren 10 bis 20 Stunden war endlich die Reinigung der Apparatur so weit fortgeschritten, daß die Brennspannung nach dem Einschalten etwa 305 Volt betrug und beim Brennen nur noch um etwa 3 Volt pro Minute stieg. Auch durch sehr gründliches Reinigen des Gases läßt sich der Wert von 305 Volt nicht mehr unterbieten. Spektroskopisch

waren dann keine Linien mehr festzustellen, die sich weder dem Argon noch dem Elektrodenmaterial zuordnen ließen.

Da das Gas durch das Brennen der Entladung immer wieder verunreinigt wurde, mußte nach jedem Meßpunkt gereinigt werden. Je größer das Verhältnis von Reinigungsdauer zur Brenndauer der Entladung ist, um so besser ist das Gas gereinigt, um so näher kommt man an den Grenzwert der Spannung heran. Bei den Messungen mit Eisenelektroden ist ein Verhältnis 20 : 1 bis 10 : 1 nötig; bei Messing genügt 6 : 1 bis 4 : 1, da hier die Verunreinigung viel langsamer vor sich geht. Die Tatsache, daß der Grad der Reinheit durch das obenerwähnte Verhältnis bestimmt wird, ermöglicht die spektroskopische Untersuchung des Gases bei verschiedenem, aber durch die Brennspannung definierten Reinheitsgrad. Hierbei zeigt sich, daß H_α schon bei Verunreinigungen, die eine Spannungserhöhung von 3 bis 5 Volt zur Folge haben, schwach sichtbar wird, während H_β erst bei etwa 40 Volt Spannungserhöhung zu bemerken ist. Bei einer Verunreinigung, bei der die Spannung den oberen Grenzwert von 450 Volt erreicht, werden H_α und H_β bereits zu den stärksten Linien des ganzen sichtbaren Spektrums.

4. Messungen.

Als Stromquelle diente eine Hochspannungsmaschine. Der positive Pol war mit dem Anodenzylinder direkt verbunden; die Kathode — als solche wird stets die Elektrode mit dem negativsten Potential bezeichnet — lag über einen hochohmigen Widerstand an dem negativen Pol. Das Potential der anderen Scheibenelektrode, der „Hilfselektrode", wurde variiert zwischen einem Potential, das wenige Volt über dem Potential der Zylinderelektrode liegt und dem der Kathode.

Bei festem Abstand von Kathode und Hilfselektrode wurden gemessen: Der Gasdruck p, der Kathodenstrom I_k, die Kathodenspannung V_k, der Strom an der Hilfselektrode I_h und die Hilfsspannung V_h. (Die Werte von V_h und V_k wurden dabei stets auf das Anodenpotential Null bezogen.) Die Messungen wurden zu Meßreihen geordnet, bei denen der Druck und die Kathodenstromstärke I_k konstant gehalten wurden. Dann lassen sich beispielsweise die Variablen I_h und V_k angeben als Funktionen von V_h.

Der Einfluß der Vorbehandlung. Nimmt man zwei Meßpunkte nacheinander auf, so dauert es immer eine gewisse Zeit, bis sich die Elektroden vom Zustand des Meßpunktes I auf den des Meßpunktes II umgestellt haben. Daran ändert die dazwischenliegende Reinigungspause nur wenig, insbesondere dann, wenn mit geringen Stromstärken gearbeitet wird. Das Umstellen äußert sich hierbei in einem Kriechen der Spannungs- und Strom-

werte. Das Intervall, in dem sich diese nach dem Einschalten ändern, ist um so größer, je verschiedener die beiden Meßpunkte sind, d. h. je größer der Unterschied der elektrischen Daten der beiden Meßpunkte ist. Um den „richtigen Wert" nach möglichst kurzer Brenndauer (vgl. hierzu Abschnitt über Reinigung) erkennen zu können, ist es daher nötig, daß nacheinander aufgenommene Meßpunkte möglichst wenig voneinander verschieden sind, d. h., daß die einzelnen Meßreihen aus einer genügend großen Zahl von Meßpunkten bestehen.

Der durch derartige Vorbehandlungseffekte veranlaßte Meßfehler läßt sich leicht dadurch abschätzen, daß man die einzelnen Meßreihen in verschiedener Richtung durchmißt, das eine Mal bei wachsendem V_h, das andere Mal bei abnehmendem V_h. Die richtigen Werte, das sind die den völlig eingebrannten Elektroden entsprechenden, müssen dann zwischen den beiden gemessenen Werten liegen. Bei Eisenelektroden war der Einfluß der Vorbehandlung so groß, daß sich die Messungen bei Drucken über 1 Torr überhaupt nicht mehr durchführen ließen. Der Unterschied zwischen den Meßreihen bei wachsendem V_h und denen bei abnehmendem V_h, sowie der zwischen rasch durchmessenen und langsam durchmessenen Meßreihen war bei größeren Drucken so groß, daß eine Mittelung nicht mehr zulässig ist. Mit Messingelektroden ließen sich die Messungen bei einiger Vorsicht bis zu 4 Torr durchführen. Da der Einfluß der Vorbehandlung bei abnehmender Stromstärke ebenfalls zunimmt, sind die Messungen bei Kathodenstromstärken, die kleiner sind als 50 mA, ziemlich unsicher und werden daher hier nur bei sehr kleinen Drucken angeführt.

5. Ergebnisse der Messungen.

In den Fig. 2 und 3 sind der Strom an der Hilfselektrode I_h (———) und die Brennspannung V_k (—·—·—·) als Funktionen der Hilfsspannung V_h aufgetragen. Der Abstand d, der Druck p und die Kathodenstromstärke I_k sind jeweils konstant gehalten. Aus diesen Kurven lassen sich die Brennspannungen bei abgeschalteter Hilfselektrode ($V_h = 0$) und bei zusammengeschalteten Kathoden ($V_h = V_k$: Hohlkathodenschaltung) leicht entnehmen. Der Übersichtlichkeit halber sind diese Werte noch einmal aufgetragen als Funktionen der Kathodenstromstärke I_k.

Die Tabelle 1 zeigt die Wirkung einer kleinen negativen Hilfsspannung (— 4 Volt) bei verschiedenen Elektrodenabständen und Drucken, die Tabelle 2 den Vergleich der Brennspannungen bei isoliert stehender Hilfselektrode und bei Hohlkathodenschaltung.

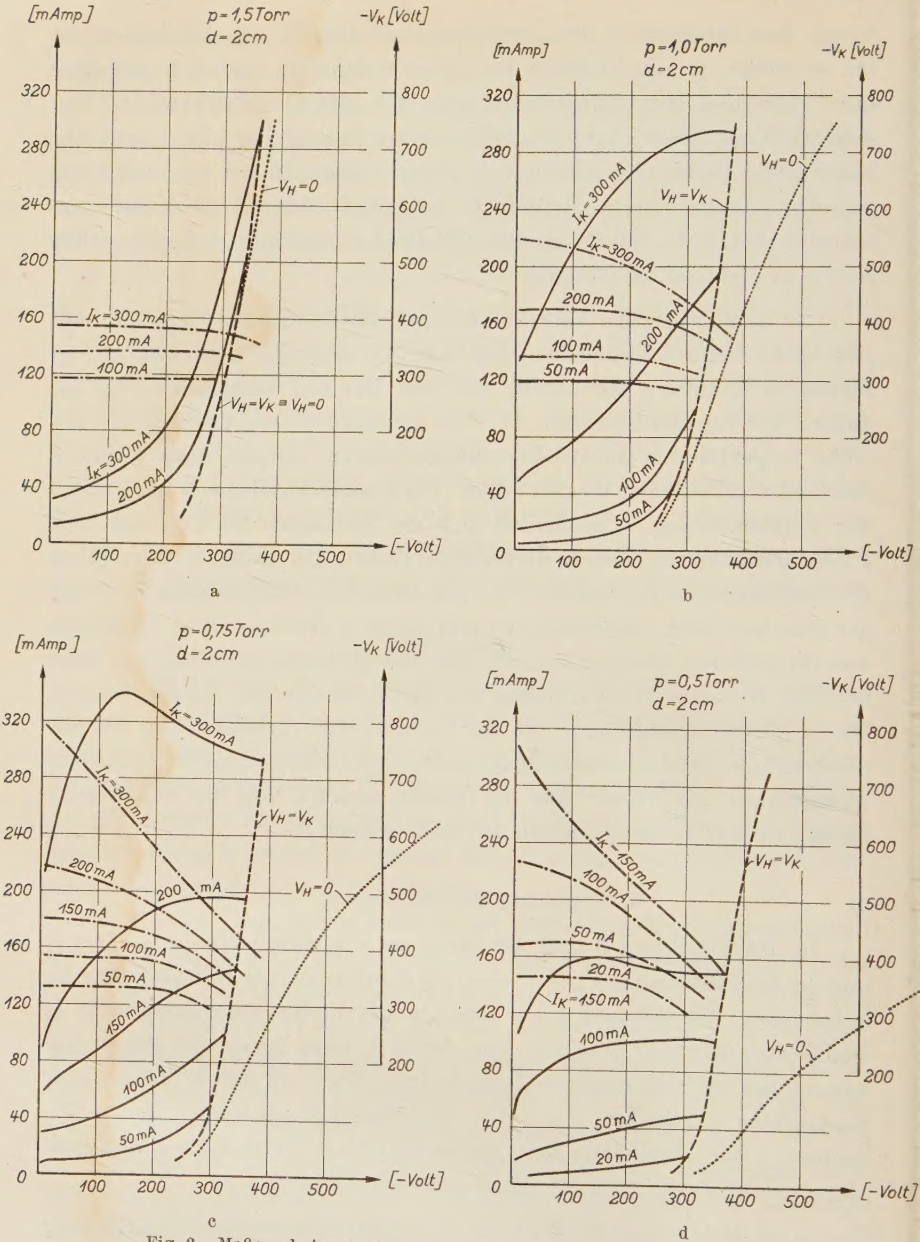

Fig. 2. Meßergebnisse mit Messingelektroden (Abstand $d = 2$ cm). Strom an der Hilfselektrode I_h (———) und Brennspannung V_k (- - - - - -) als Funktion der Spannung an der Hilfselektrode V_H bei konstanter Kathodenstromstärke I_k. Außerdem: Hohlkathodencharakteristik $V_h = V_k$ (------) und Charakteristik bei abgeschalteter Hilfselektrode $V_h = 0$ (. . . . .).

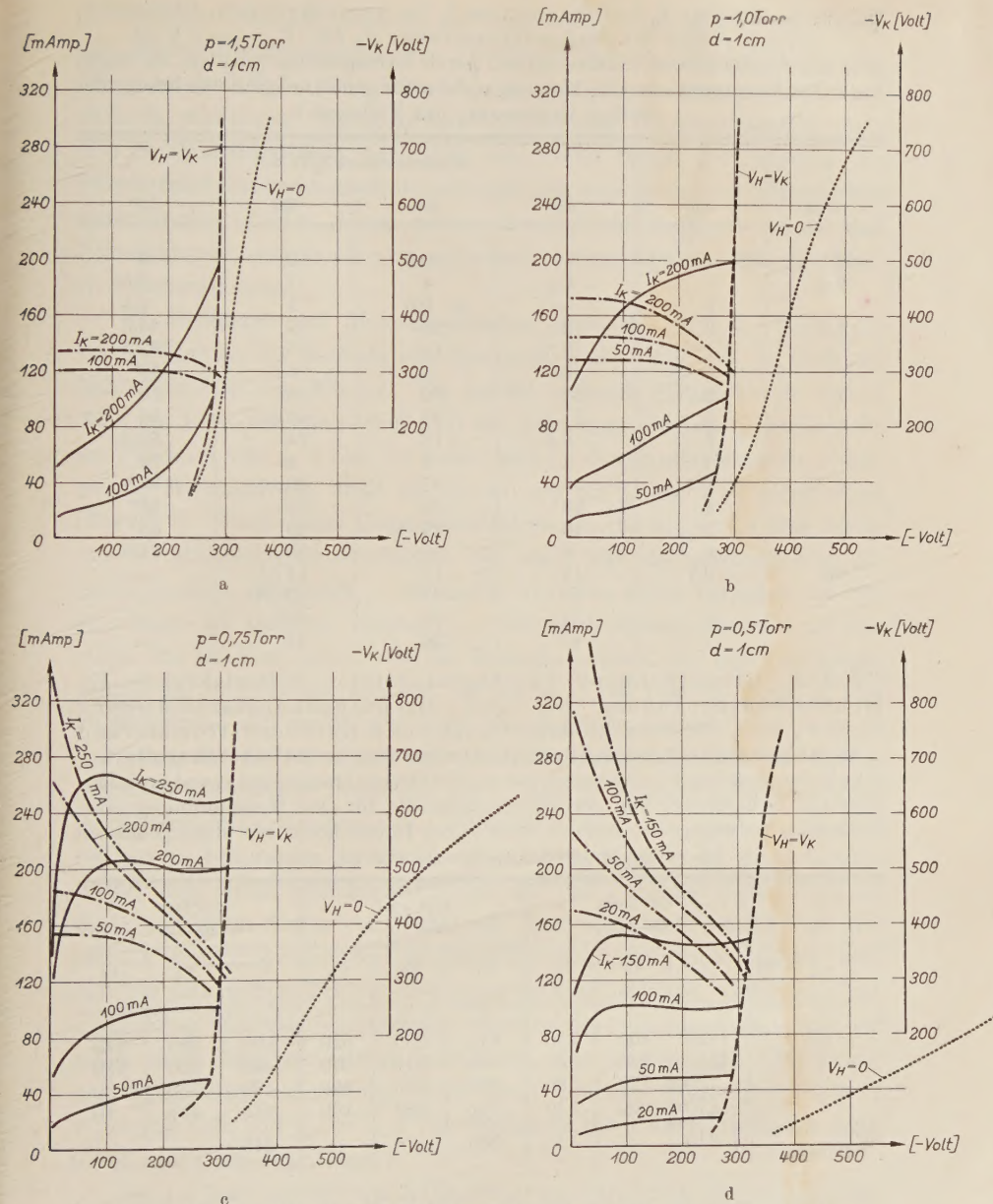

Fig. 3. Meßergebnisse mit Messingelektroden (Abstand $d = 1$ cm).
Strom an der Hilfselektrode I_h (————) und Brennspannung V_k (- - - - - -) als Funktion der Spannung an der Hilfselektrode V_H bei konstanter Kathodenstromstärke I_k.
Außerdem: Hohlkathodencharakteristik $V_h = V_k$ (- - - - - -) und Charakteristik bei abgeschalteter Hilfselektrode $V_h = 0$ (· · · · · · ·).

Tabelle 1. Ströme I_h in Prozent von I_k bei verschiedenem Abstand d, Druck p und Kathodenstromstärke I_k für $V_h = -4$ Volt.
(Die mit * bezeichneten Zahlen wurden durch Extrapolation erhalten, da wegen der hohen Brennspannung die Messung nicht mehr genau möglich war infolge der raschen Erwärmung des Füllgases.)

p	d	Kathodenstrom I_k in mA			
Torr	cm	50	100	200	300
3,5	1	—	0,5	2	3
2,5	1	0,5	4	7	9,5
	2	—	< 0,5	1	1,5
1,5	0,7	12	25	37	44,5
	1	8,5	16	25	33,5
	2	3	5	6,5	10
1	0,7	22	36	46	50
	1	21	33	46,5	54
	2	8,5	13	24	38,5
	4	1	2	4	12
0,75	0,7	26	37	40	33*
	1	33	45	53	53*
	2	16	26	45	58
	4	3	5	16	37,5
0,5	0,7	14	19	11 (!)	—
	1	36	~ 43	33 (?)*	—
	2	34,5	51	58*	—
	4	~ 12	26	47	—

Tabelle 2. Brennspannung bei abgeschalteter Hilfselektrode V_1, Hohlkathodenspannung V_2 und Brennspannungserniedrigung $V_3 = V_1 - V_2$ für verschiedene Drucke und Kathodenstromstärken in Abhängigkeit vom Abstand der beiden Scheibenelektroden.
(Die Messungen von V_1 sind wegen der großen Druckabhängigkeit etwas unsicher. Dies gilt insbesondere von den Spannungen, die für eine Meßanordnung ohne Hilfselektrode angegeben sind, da diese durch Interpolation aus Meßergebnissen bei etwas anderen Drucken gewonnen wurden.)

p / I_k	0,5 Torr 150 mA			0,75 Torr 200 mA			1,0 Torr 200 mA		
d \ V(Volt)	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3	V_1	V_2	V_3
0,7	1230	300	930	815	295	520	500	285	215
1	1150	320	830	660	310	350	430	300	130
2	760	370	390	550	355	195	430	350	80
4	870	500	370	585	485	100	445	435	10
Ohne Hilfselektrode	915			585			445		

Bringt man die beiden Scheibenelektroden auf gleiches Potential, so hat man eine Art Hohlkathode vor sich[1]). Diese unterscheidet sich von einer

[1]) A. Güntherschulze, ZS. f. techn. Phys. **11**, 49, 1930.

gewöhnlichen Kathode dadurch, daß man bei geeignetem Gasdruck durch die gleiche Brennspannung eine bedeutend höhere Stromdichte erzielt. (Eine gewöhnliche Kathode läßt sich, von kleinen Abweichungen abgesehen, dadurch realisieren, daß man der Hilfselektrode Anodenpotential gibt.) Der Hohlkathodeneffekt tritt nicht auf, wenn Druck und Abstand der Scheibenelektroden so gewählt sind, daß sich zwei getrennte Glimmlichter unterscheiden lassen. Dann wirken die Gebilde Kathode—Anode und Hilfselektrode—Anode als zwei getrennte, voneinander unabhängige Elektrodenanordnungen.

a) Messungen mit Messingelektroden, Abstand $d = 2$ cm. Legt man bei 2,5 Torr an die Kathode eine Spannung von — 305 Volt, so fließt ein Kathodenstrom von 300 mA. Die isoliert stehende Hilfselektrode nimmt dann ein Potential von — 0,65 Volt an. Gibt man jetzt der Hilfselektrode ein Potential von — 4 Volt, so ändert sich an dem Kathodenstrom nichts, an die Hilfselektrode fließt ein Strom von 1,5% des Kathodenstromes (Tabelle 1). Durch dieses Gegenpotential werden die langsamen Elektronen von der Hilfselektrode abgehalten. Sie wirkt hier also gewissermaßen als große Sonde[1]). Man sieht — deutlicher wird dies durch Vergleich mit den Messungen bei kleineren Drucken —, daß die Hilfselektrode bei 2 cm Abstand und 2,5 Torr soweit von der Kathode entfernt ist, daß nur wenige Träger zu ihr gelangen können. Ist $V_h = -100$ Volt, so fließt an der Hilfselektrode ein Strom von 3,7% des Kathodenstromes. Bei weiterer Erhöhung der Hilfsspannung tritt bald eine *selbständige, von der Hauptentladung unabhängige Entladung* auf. Dann ist beispielsweise annähernd die gleiche Hilfsspannung von — 250 Volt nötig, um einen Strom von 100 mA zu bekommen, ob die Hauptentladung brennt oder nicht brennt. Bringt man beide Scheibenelektroden auf das Potential — 305 Volt, so fließt an sie ein Strom von je 300 mA. Man sieht, daß bei 2,5 Torr und 300 mA Kathodenstrom der Hohlkathodeneffekt noch nicht auftritt, und daß nur sehr wenige Träger zur Gegenelektrode gelangen. Geht man nun zu kleineren Kathodenstromstärken über, so zieht sich das Glimmlicht auf einen noch kleineren Raum zusammen, die gegenseitige Einwirkung der Elektroden aufeinander wird noch kleiner. (Für $I_k = 100$ mA, $V_k = 250$ Volt und $V_h = -4$ Volt fließen an der Hilfselektrode nur noch 0,5% des Kathodenstromes.)

Bei 1,5 Torr und 300 mA Kathodenstrom tritt bereits eine gegenseitige Beeinflussung der beiden Entladungen auf. Eine Hilfsspannung von

[1]) W. Weizel u. H. Fischer, Ann. d. Phys. **24**, 209, 1935; H. Fischer, ebenda **27**, 81, 1936.

— 1 Volt hat einen Strom I_h von 10% des Kathodenstromes zur Folge; bei — 100 Volt sind es 15%, bei — 250 Volt 120 mA = 40% des Kathodenstromes. Ohne Hauptentladung fließen dagegen bei — 250 Volt nur 38 mA. Es findet also jetzt schon eine *deutlich merkbare Wechselwirkung* der beiden Entladungen miteinander statt. Das Anlegen der Hilfsspannung hat auch eine Beeinflussung der Brennspannung V_k zur Folge (Fig. 2a). Bei $V_h = 0$ ist eine Brennspannung von 390 Volt nötig, um eine Kathodenstromstärke von 300 mA zu erhalten; bei $V_h = V_k$ genügen 365 Volt. Dies sind die ersten Anzeichen der Hohlkathodenwirkung bei kleineren Drucken.

Bei 1 Torr (Fig. 2b) ist die Wechselwirkung der beiden Glimmlichter aufeinander schon ziemlich groß. An die Hilfselektrode fließen schon bei kleinen Spannungen beträchtliche Ströme. Für $I_k = 300$ mA sind es bei den Hilfsspannungen — 4 Volt und — 100 Volt 39% bzw. 70% des Kathodenstromes. Jetzt treten auch schon die ersten Anzeichen für den neuen Effekt auf. Die Stromkurve für $I_k = 300$ mA hat für eine Hilfsspannung von etwa 350 Volt ein allerdings noch ziemlich schwaches Maximum. Bei kleineren Kathodenstromstärken ist hiervon noch nichts zu merken. Dann sind auch die bei — 4 Volt gemessenen Ströme wesentlich kleiner (Tabelle 1). Die wesentlich ausgeprägtere Hohlkathodenwirkung ersieht man aus Tabelle 2.

Bei einem Druck von 0,75 Torr, einer Kathodenstromstärke von 300 mA fließen bei einer Hilfsspannung von — 4 Volt fast 60% des Kathodenstromes. I_h steigt mit wachsender Hilfsspannung und erreicht schon bei $V_h = -60$ Volt die Größe des Kathodenstromes (Fig. 2c). *60 Volt Hilfsspannung ziehen also den gleichen kathodischen Strom an die Hilfselektrode wie 740 Volt an die Kathode. Der Strom I_h nimmt weiter zu und hat ein Maximum von 115% des Kathodenstromes für $V_h = -150$ Volt. Es fließt somit, obwohl die Anordnung der beiden Scheibenelektroden völlig symmetrisch ist, an die Kathode mit dem kleineren Potential ein um 15% größerer Strom*[1]). Bei weiter wachsendem V_h nimmt der Strom wieder ab bis bei — 385 Volt an beiden Scheibenelektroden bei gleichen Spannungen gleiche Ströme fließen. Man beachte auch das Absinken von V_k mit wachsendem V_h (strichpunktierte Kurven) und den Unterschied zwischen der Hohlkathodencharakteristik (gestrichelt) und der Charakteristik bei abgeschalteter Hilfs-

[1]) Bei günstigerer Wahl des Druckes wird der Stromunterschied an beiden Elektroden noch wesentlich größer. In Fig. 4 sind z. B. einige Messungen mit Eisenelektroden aufgetragen. Dort erhält man bei einem Druck von 0,75 Torr und einem Kathodenstrom von 300 mA einen Hilfsstrom von fast 127% des Kathodenstromes.

elektrode (punktiert). Bei $I_k = 200$ mA tritt das Maximum des Hilfsstromes nicht auf. Man erhält es beim Übergang zu kleineren Drucken ($p = 0{,}65$ Torr, $V_h = -225$ Volt, $I_h/I_k = 104\%$). Bei 0,5 Torr (Fig. 2d) erhält man bereits für $I_k = 150$ mA ein Maximum mit $I_h/I_k = 107\%$ für $V_h = -150$ Volt.

Man sieht aus den Kurven der Fig. 2, daß bei den niedrigen Drucken schon bei kleinen Kathodenstromstärken außerordentlich große Ströme an die Hilfselektrode fließen. (Für $I_k = 100$ mA, $V_h = -200$ Volt sind es 100% des Kathodenstromes bei 0,5 Torr, nur 38% dagegen bei 1,0 Torr).

Verbindet man, um die Abhängigkeit des Effektes von der Stromstärke zu erkennen, die Maxima der verschiedenen Kurven, die zu einem Druck gehören, miteinander, so zeigt sich folgendes: 1. Der Hilfsstrom, in % des Kathodenstromes ausgedrückt, steigt bei wachsendem I_k. 2. Die zugehörigen Spannungswerte V_h nehmen hierbei ab [1]).

b) Meßergebnisse bei anderen Abständen (Fig. 3a bis 3d und Tabellen 1 und 2). Die Änderungen der Meßergebnisse beim Übergang zu 1 cm *Abstand* rühren daher, daß eine gegenseitige Durchdringung der beiden Glimmlichter schon bei wesentlich höheren Drucken stattfindet. Die Ströme bei -4 Volt Hilfsspannung sind bei 1 cm Abstand im allgemeinen größer als bei 2 cm Abstand (Tabelle 1). Nur bei 0,5 Torr sind die Hilfsströme zum Teil kleiner als bei 2 cm Abstand. Bei so niedrigem Druck gelangen schon rasche Elektronen von der Kathode zur Hilfselektrode und liefern zusätzlichen Strom in entgegengesetzter Richtung. Dieser macht sich besonders dann sehr stark bemerkbar, wenn infolge Behinderung durch die angenäherte Hilfselektrode [2]) die Brennspannung erhöht wird (Tabelle 2: Bei 0,5 Torr und $I_k = 150$ mA ist die Brennspannung bei 2 cm Abstand 760 Volt, bei 1 cm Abstand 1150 Volt). Auch bei größeren Hilfsspannungen ist der Strom für 1 cm Abstand meist größer als für 2 cm Abstand. (Vergleich der Fig. 2 und 3.) Von gewissen Abweichungen soll erst später die Rede sein.

Wie auch die gemessenen Glimmlichthöhen vermuten lassen, wird umgekehrt bei 4 cm *Abstand* nur bei kleinstem Druck und verhältnismäßig großen Kathodenstromstärken eine nennenswerte Zahl von Trägern zur

---

[1]) Diese Tatsachen wurden den Messungen mit Eisenelektroden entnommen, da hier ein dichteres Kurvennetz vorhanden war. Auf diese Messungen wird hier jedoch nicht weiter eingegangen, da sie qualitativ dasselbe ergeben wie die Messungen bei Messing, aber aus den früher erwähnten Gründen (siehe Abschnitt über Vorbehandlung) nur für einen ziemlich kleinen Druckbereich durchgeführt werden konnten. — [2]) A. Güntherschulze, ZS. f. Phys. **61**, 1, 581, 1930.

Hilfselektrode gelangen. So ist für $I_k = 50$ mA der Strom an der Hilfselektrode bei $p = 1$ Torr nur noch 1 % des Kathodenstromes gegen 21 % bei 1 cm Abstand und sonst gleichen Verhältnissen. (Weitere Beispiele in Tabelle 1.) Das Strommaximum an der Hilfselektrode tritt jetzt nur noch bei sehr kleinen Drucken und verhältnismäßig großen Kathodenstromstärken auf ($p = 0{,}5$ Torr, $I_k = 150$ mA, $I_h/I_k = 106\,\%$ für $V_h = -260$ Volt). Auch die Hohlkathodenwirkung ist nicht mehr so ausgeprägt wie bei den kleinen Abständen vorhanden (Tabelle 2).

Es ist bemerkenswert, daß bei konstantem Strom die Hohlkathodenspannung mit abnehmendem Elektrodenabstand stets fällt. Das Minimum der Hohlkathodenspannung ist also für Argon bei sehr kleinen Abständen zu suchen. Auffallend ist bei dem kleinen Abstand auch die außerordentlich steile Hohlkathodenkennlinie. (Bei den Messungen mit Eisenelektroden bei 1 cm Abstand konnte man die Hohlkathodencharakteristik innerhalb der Meßfehler sogar als senkrecht bezeichnen.)

6. Diskussion der Meßergebnisse.

In den vorliegenden Messungen wurde festgestellt, welche Trägerströme unter den verschiedenen Bedingungen aus dem Plasma gezogen werden können. Jetzt soll versucht werden, zu erklären, durch welchen Mechanismus diese oft unerwartet großen Ströme zustande kommen können. Vor allem sei gefragt, inwiefern es möglich ist, daß bei völlig symmetrischer Meßanordnung an die Elektrode mit dem kleineren Potential der größere kathodische Strom fließt.

Sowohl der Kathodenstrom als auch der Hilfsstrom setzen sich zusammen aus dem Ionenanteil und dem Elektronenanteil. Zählt man dabei die an den Elektroden reflektierten Ionen überhaupt nicht, so besteht der Ionenanteil nur aus solchen Ionen, die auf die Elektrode zuwandern. Anders ist es beim Elektronenanteil. Dieser setzt sich zusammen aus Elektronen, die zur Elektrode hinwandern, und solchen, die sie verlassen. Es ist jetzt festzustellen, ob die Ionen oder die Elektronen die Ursache sind, daß I_h größer als I_k ist. Da zunächst kein Grund vorzuliegen scheint, daß sich mehr Ionen zur Elektrode mit dem positiveren Potential begeben, liegt die Vermutung nahe, daß es sich um Elektronen handelt, die die Hilfselektrode verlassen.

Der Stromüberschuß könnte dann folgendermaßen zustande kommen: Durch das Ionenbombardement der Kathode werden dort Elektronen ausgelöst, die im Fallraum beschleunigt werden. Zwischen den beiden

Elektroden ionisieren sie, regen Gasatome an und gelangen schließlich noch zum großen Teil mit einiger Energie zur Hilfselektrode. Diese Elektronen verkleinern zunächst den Hilfsstrom. Es wäre jedoch denkbar, daß durch Sekundäremission wesentlich mehr Elektronen die Hilfselektrode verlassen als zu ihr gelangen. Diese Elektronen könnten dann den Stromüberschuß an der Hilfselektrode erklären.

Legt man für diesen Vorgang die Daten zugrunde, die für die Befreiung von Elektronen aus Grenzflächen durch Elektronenstrahlen gemessen

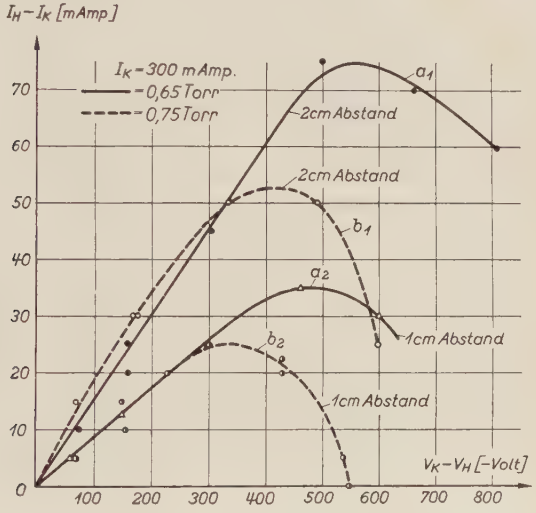

Fig. 4. Messungen mit Eisenelektroden.

Stromüberschuß $I_h - I_k$ als Funktion der Vorspannung $V_k - V_h$ bei konstanter Kathodenstromstärke (Meßgenauigkeit ± 5 mA).

wurden[1]), so gerät man in Schwierigkeiten. Da aber die Sekundäremission durch Gasbeladung der Hilfselektrode stark erhöht werden kann, sollen andere Argumente herangezogen werden, die gegen diese Deutung sprechen.

In Fig. 4 ist der Stromüberschuß an der Hilfselektrode gegen die Potentialdifferenz der beiden Scheibenelektroden aufgetragen. Aus den Kurven a_1 und b_1 sieht man, daß schon ein Potentialunterschied von 70 Volt ein Wachsen des Hilfsstromes hervorbringt; sogar schon kleinere Potentialunterschiede machen ihn schon größer als den Kathodenstrom. Elektronen

[1]) Knoll-Ollendorf-Rompe, Gasentladungstabellen, S. 77, 1935.

so kleiner Geschwindigkeit werden aber zum großen Teil *ohne Sekundäremission* aufgenommen, zumal sie auf dem Wege zur Hilfselektrode noch Energie verlieren. Es wäre deshalb eigentlich anzunehmen, daß, solange $V_h - V_k$ klein ist, eine Verkleinerung des Stromes durch Elektronenaufnahme an der Hilfselektrode auftritt. Bei 1 cm Abstand gelangen bei gleicher Potentialdifferenz die Elektronen natürlich mit weniger Geschwindigkeitsverlust zur Hilfselektrode. Wenn also schon bei 2 cm Abstand eine Zunahme des Hilfsstromes bemerkbar ist, so müßte sie bei 1 cm Abstand noch viel größer sein. Der Vergleich der entsprechenden Kurven der Fig. 4 zeigt, daß das Gegenteil der Fall ist. *Sekundäremission durch Elektronen* kommt daher als Ursache für die beobachteten Effekte nicht oder höchstens in zweiter Linie in Frage. Man könnte nun noch an *Sekundäremission durch neutrale Teilchen* denken. Es liegt jedoch kein Grund vor, warum auf die Hilfselektrode mehr neutrale Teilchen von geeigneter Beschaffenheit gelangen sollten als zur Kathode.

Sekundäremission von Elektronen durch Ionen kann die Ursache des Effektes auch nicht sein. Es müßte sonst, wie man leicht nachrechnet, an der Hilfselektrode für die Ionen mit kleinerer Geschwindigkeit γ (das ist die Zahl der Elektronen, die im Mittel von einem Ion aus der Elektrode ausgelöst werden) etwa doppelt so groß sein als an der Kathode.

Da somit alle Möglichkeiten erschöpft sind, daß *mehr Elektronen die Hilfselektrode verlassen* als die Kathode, muß angenommen werden, daß der größere Strom an der Hilfselektrode durch den Ionenteil verursacht wird. *Es müssen also mehr Ionen zur Hilfselektrode gelangen als zur Kathode.*

Da der Abstand der beiden Scheibenelektroden groß ist gegenüber der Dunkelraumdicke, ist der größte Teil des Raumes zwischen den beiden Elektroden annähernd feldfrei. Ionen können deshalb nur dann die Ursache des größeren Stromes sein, *wenn in der Nähe der Hilfselektrode mehr Ionen entstehen als bei der Kathode.*

Für die Erzeugung von positiven Ionen kommt hauptsächlich Stoßionisation durch Elektronen in Frage. Zur Beschreibung dieses Prozesses dient der Begriff des differentiellen Ionisierungskoeffizienten[1]). Dieser

---

[1]) A. v. Engel u. M. Steenbeck, Elektr. Gasentladungen I, S. 32, 1932. Für die Benutzung der sogenannten Ionisierungszahl (A. v. Engel u. M. Steenbeck, Elektr. Gasentladungen I, S. 91), die auch Rogowski in seiner Theorie der Glimmentladung benutzt, liegen die Voraussetzungen nicht vor, da der visuell erkennbare Dunkelraum nicht groß ist gegenüber der freien Weglänge der Elektronen.

gibt an, wieviel Ionenpaare ein Elektron von vorgegebener Geschwindigkeit bei 1 Torr auf 1 cm seines Weges erzeugt. Die differentielle Ionisierung (Ionenpaare pro cm) in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Elektronen sei kurz als *Ionisierungsfunktion* bezeichnet. Diese wurde für Argon von verschiedenen Autoren gemessen[1]). Sie erhalten alle ein Maximum der Funktion für Elektronen einer Geschwindigkeit von etwa 150 Volt mit 12 bis 15 Ionen/cm. Die Funktion fällt bei wachsender Geschwindigkeit zunächst rasch, dann langsam und hat bei 600 Volt noch einen Wert von 5 bis 6 Ionen/cm.

Gibt man nun beispielsweise der Kathode ein Potential von — 600 Volt, der Hilfselektrode — 150 Volt, so werden im Fallraum die an der Kathode ausgelösten Elektronen auf eine Geschwindigkeit von 600 Volt beschleunigt. Aus der Ionisierungsfunktion läßt sich jetzt leicht die örtliche Verteilung der erzeugten Träger berechnen. Wegen der Anregungsverluste wird hierbei pro Ionisation ein mittlerer Energieverbrauch von 40 Volt[2]) angenommen. Das Ergebnis der Rechnung ist, daß je nach Gasdruck in 1 bis 3 cm Entfernung von der Kathode die Trägerkonzentration mehr als doppelt so groß ist als in Kathodennähe.

Der Potentialanstieg von den Scheibenelektroden zum feldfreien Plasma erstreckt sich auf ein sehr kleines Wegstück. Der Trägertransport zu den Elektroden findet daher auf dem größten Teil des Weges durch Diffusion statt. Langsame Plasmaelektronen werden durch das Potential von — 150 bzw. — 600 Volt von den Scheibenelektroden ferngehalten. Ionen dagegen, die in einen der Fallräume gelangen, werden sehr rasch zur entsprechenden Elektrode getrieben. Deshalb werden *an diejenige Elektrode die meisten Ionen kommen, die in der Gegend der größten Trägererzeugung steht.* Bei geeignetem Druck und Abstand ist dies die Hilfselektrode. Auf diese Weise kann man die meisten Eigenschaften der betrachteten Glimmentladung erklären.

Es muß jedoch beachtet werden, daß das Maximum der Trägerkonzentration durch Seitwärtsstreuung eines großen Teiles der Elektronen unter Umständen stark abgeflacht werden kann. Dem Versuch, die Streuung rechnerisch zu ermitteln, stellen sich große Schwierigkeiten entgegen, da die Angaben in der Literatur über Winkelstreuung rascher Elektronen insbesondere für kleine Streuwinkel zum Teil recht erheblich voneinander

[1]) Knoll-Ollendorf-Rompe, Gasentladungstabellen 1935, S. 67. — [2]) A. v. Engel u. M. Steenbeck, Elektr. Gasentladungen I, S. 41, 1932.

abweichen und fast durchweg nur über Relativmessungen berichten[1]). Bei sehr starker Streuung würde, wenn die Hilfselektrode nicht zu weit weg ist, ein annähernd homogenes Plasma entstehen. In Wirklichkeit wird bei mäßiger Streuung immer noch eine *Verminderung der Ionisierung in der Nähe der Kathode* auftreten.

Der erhöhte Strom an der Hilfselektrode könnte aber auch erklärt werden, wenn man annimmt, daß die Kathodenelektronen ein *völlig homogenes Plasma* erzeugen. Aus diesem werden nämlich dann an beide Scheibenelektroden etwa gleichviele Ionen diffundieren. Die Ionen, die an die Hilfselektrode gelangen, lösen dort ebenfalls Elektronen aus, die unter den angegebenen Bedingungen auf 150 Volt beschleunigt werden. Diese Elektronen haben aber wegen des Maximums der Ionisierungsfunktion nur eine geringe Reichweite und sorgen deshalb für eine *Erhöhung der Ionendichte in der Nähe der Hilfselektrode.*

Die Unsymmetrie der Ionenverteilung entstünde also jetzt dadurch, daß wohl die Elektronen der Kathode den ganzen Raum gleichmäßig mit Ionen beliefern, die der Hilfselektrode dagegen nur in deren nächster Umgebung Ionen erzeugen.

Die beiden zur Erklärung herangezogenen Vorgänge laufen nebeneinander her, da die Bedingungen, unter denen sie zustande kommen, die gleichen sind. Es ist jedesmal nötig, daß Abstand und Gasdruck klein genug sind, daß in der Nähe der Hilfselektrode noch ausreichende Ionisation durch Kathodenelektronen stattfindet. Das bedeutet, daß *die Hilfselektrode im negativen Glimmlicht der Kathode* stehen muß.

Es muß jetzt noch festgestellt werden, ob sich auch die übrigen Meßergebnisse auf die angegebene Art erklären lassen. Die Deutung des großen Stromes an der Hilfselektrode als Folge von Sekundäremission scheiterte daran, daß eine bestimmte kleine Potentialdifferenz $V_k - V_h$ bei 2 cm Abstand einen größeren Strom an der Hilfselektrode hervorrief als bei 1 cm Abstand (s. Fig. 4). Da der Hilfsstrom bei größerer Entfernung wieder einmal kleiner wird, muß es für einen bestimmten Abstand ein Maximum des Hilfsstromes geben. Um diese Eigenart zu deuten, soll bewiesen werden, daß es einen bestimmten Abstand der beiden Scheibenelektroden gibt, für den schon bei kleiner Potentialdifferenz sowohl die von der Kathode ausgehenden als auch die von der Hilfselektrode kommenden Elektronen ihre Hauptionisierung auf der Seite der Hilfselektrode haben.

---

[1]) Die Literatur hierüber bis 1933 ist in dem Bericht von A. Becker, Korpuskularstrahlen I, in Phys. in regelm. Ber. II, 1934 angegeben.

Für die Hohlkathodenschaltung und sehr großen Abstand der Elektroden befindet sich der Ort größter Ionisierung jeweils in der Nähe derjenigen Elektrode, von der die ionisierenden Elektronen ausgehen. In der Mitte ist die Trägerdichte geringer. Nähert man jetzt bei gleichem Gesamtstrom 2 I_k die Elektroden einander, so wird dieses Gebiet kleiner Trägerdichte eingeengt und verschwindet schließlich ganz. Es kann jetzt ein Abstand d_0 so gewählt werden, daß sich die Orte der größten Ionisierung in der Mitte zwischen den beiden Elektroden überdecken. Gibt man jetzt der Hilfselektrode ein etwas niedrigeres Potential V_h, so muß V_k, damit der Kathodenstrom I_k fließen kann, größer werden (Fig. 2 und 3). Dadurch rückt der Punkt der größten Ionisierung für die Elektronen beider Elektroden zur Hilfselektrode hin (Grund: Ionisierungsfunktion). Wählt man also einen Abstand von der Größe d_0, so wird durch eine kleine Spannungsdifferenz $V_k - V_h$ offenbar die *größte Unsymmetrie in der Ionenverteilung* erzeugt. Geht man nämlich zu kleineren Abständen über, so liegen die Maxima der Ionisierung schon auf der Seite der jeweils gegenüberliegenden Elektrode. Wie man sich leicht klar macht, hat dann eine kleine Potentialdifferenz keine so große Wirkung auf den Strom mehr. Eine wirksame Stromerhöhung an der Hilfselektrode kann sich daher erst bei größerer Potentialdifferenz ausbilden.

Auf ähnliche Weise läßt sich auch die Abhängigkeit des Hohlkathodeneffektes von dem Abstand d erklären:

Bei sehr großem Abstand liegen zwei getrennte Glimmlichter vor. Der Hohlkathodeneffekt tritt daher nicht auf. Bringt man nun die Elektroden näher zusammen, so gelangen allmählich Ionen *durch Diffusion* aus den kathodischen Entladungsteilen einer Elektrode zur Gegenelektrode. Dort lösen sie Elektronen aus. Nun sagt die Stationaritätsbedingung für eine Glimmentladung aus, daß für jedes die Kathode verlassende Elektron im Mittel wieder ein solches entstehen muß. Diese Bedingung kann aber jetzt mit einer kleineren Brennspannung erfüllt werden. Je kleiner der Abstand der Elektroden ist, um so größer ist die Zahl der zur Gegenelektrode gelangenden Ionen und um so größer ist daher auch die Brennspannungserniedrigung. Bei genügend kleinem Abstand, bzw. entsprechend kleinem Druck findet sogar die größte Ionisierung der aus einer Elektrode ausgelösten Elektronen in der Nähe der Gegenelektrode statt. Bringt man die Elektroden sehr nahe zusammen, so werden rasche Elektronen im Fallraum der Gegenelektrode zurückgeworfen. Dadurch wird natürlich die Ionendichte wesentlich erhöht, da das Elektron zweimal, oder, wenn dieser Vorgang

in ein Hin- und Herpendeln ausartet [1]), mehrere Male am gleichen Ort ionisiert. Durch das Annähern wird daher die für einen bestimmten Strom erforderliche Brennspannung immer mehr verkleinert. Dies wird solange gehen, als die Elektronen noch ohne großes beschleunigendes Feld zur Anode gelangen können.

Zum Schluß möchte ich meinem hochverehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. W. Weizel, herzlichst danken für seine Hilfe und das stets fördernde Interesse, das er dieser Arbeit, insbesondere auch während seiner Abwesenheit von Karlsruhe, entgegenbrachte.

Ferner danke ich für die Beschaffung der zu den Untersuchungen nötigen Hilfsmittel der Helmholtz-Gesellschaft, der Notgemeinschaft der deutschen Wissenschaft, der Karlsruher Hochschulvereinigung sowie der Firma Lindes Eismaschinen A.-G.

Der experimentelle Teil dieser Arbeit wurde im Institut für theoretische Physik der technischen Hochschule Karlsruhe durchgeführt.

---

[1]) Vgl. A. v. Engel u. M. Steenbeck, Elektr. Gasentladungen II, 1934, S. 114.

Lebenslauf

Am 7. Juli 1911 wurde ich, Karl Geiger, als Sohn des Ingenieurs Karl Geiger und seiner Ehefrau Luise geb. Jakob in Oberkirch (Baden) geboren. Ich bin evangelischer Konfession. Ab Herbst 1920 besuchte ich die Bürgerschule und spätere Oberrealschule in Rastatt. Diese verließ ich Ostern 1929 mit dem Reifezeugnis, um mich dem Studium der Physik und der Mathematik an der Technischen Hochschule in Karlsruhe zu widmen. Im Sommersemester 1931 und im Wintersemester 1931/32 studierte ich an der Universität Göttingen, von Sommersemester 1932 bis Sommersemester 1933 an der Universität München und im Wintersemester 1933/34 wieder an der Technischen Hochschule Karlsruhe. Im Januar 1935 bestand ich die badische Staatsprüfung für das höhere Lehramt. Im Anschluß hieran begann ich im Institut für theoretische Physik der Technischen Hochschule Karlsruhe auf Anregung von Herrn Professor Dr. W. Weizel die vorliegende Arbeit, deren experimenteller Teil im Juli 1936 abgeschlossen wurde. Die mündliche Doktorprüfung fand am 21. Dezember 1936 statt.